

CERTIFIED COPY OF
PRIORITY DOCUMENT

日 本 国 特 許 庁
JAPAN PATENT OFFICE

別紙添付の書類に記載されている事項は下記の出願書類に記載されて
いる事項と同一であることを証明する。

This is to certify that the annexed is a true copy of the following application as filed
with this Office.

出 願 年 月 日 2 0 0 3 年 8 月 2 0 日
Date of Application:

出 願 番 号 特 願 2 0 0 3 - 2 9 6 7 8 2
Application Number:
[ST. 10/C]: [J P 2 0 0 3 - 2 9 6 7 8 2]

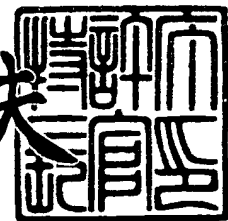
願 人 独立行政法人通信総合研究所
Applicant(s):

CERTIFIED COPY OF
PRIORITY DOCUMENT

2 0 0 4 年 1 月 2 0 日

特許庁長官
Commissioner,
Japan Patent Office

今 井 康 夫



出証番号 出証特 2 0 0 4 - 3 0 0 1 2 5 6



IN THE UNITED STATES PATENT AND TRADEMARK OFFICE

In re the Application of: Kyoya FUKUDA et al.

Serial No.: 10/811,142

Confirmation No.: 8466

Filed: March 29, 2004

Group Art Unit No.: 2828

For: LASER FREQUENCY STABILIZATION DEVICE AND A METHOD FOR LASER
FREQUENCY STABILIZATION

Attorney Docket No.: 042132

Customer No.: 38834

CLAIM FOR PRIORITY UNDER 35 U.S.C. 119

Commissioner for Patents
P. O. Box 1450
Alexandria, VA 22313-1450

August 6, 2004

Sir:

The benefit of the filing date of the following prior foreign application is hereby requested for the above-identified application, and the priority provided in 35 U.S.C. 119 is hereby claimed:


Japanese Appln. No. 2003-296782, filed on August 20, 2003

In support of this claim, the requisite certified copy of said original foreign application is filed herewith.

It is requested that the file of this application be marked to indicate that the applicants have complied with the requirements of 35 U.S.C. 119 and that the Patent and Trademark Office kindly acknowledge receipt of said certified copy.

In the event that any fees are due in connection with this paper, please charge our Deposit Account No. 50-2866.

Respectfully submitted,
WESTERMAN, HATTORI, DANIELS & ADRIAN, LLP


Stephen G. Adrian
Reg. No.: 32,878

1250 Connecticut Avenue, N.W., Suite 700
Washington, D.C. 20036
Tel: (202) 822-1100
Fax: (202) 822-1111
SGA/II

【書類名】 特許願
【整理番号】 P03-0070
【特記事項】 特許法第 3 0 条第 1 項の規定の適用を受けようとする特許出願
【提出日】 平成15年 8月20日
【あて先】 特許庁長官 殿
【国際特許分類】 H01S 5/0687
H01S 3/131

【発明者】
【住所又は居所】 東京都小金井市貫井北町 4 - 2 - 1 独立行政法人通信総合研究所内
【氏名】 福田 京也

【発明者】
【住所又は居所】 神奈川県川崎市多摩区東三田 1 - 1 - 1 明治大学内
【氏名】 立川 真樹

【特許出願人】
【識別番号】 301022471
【氏名又は名称】 独立行政法人通信総合研究所

【代理人】
【識別番号】 100092783
【弁理士】
【氏名又は名称】 小林 浩
【電話番号】 03-3273-2611

【選任した代理人】
【識別番号】 100095360
【弁理士】
【氏名又は名称】 片山 英二

【選任した代理人】
【識別番号】 100093676
【弁理士】
【氏名又は名称】 小林 純子

【選任した代理人】
【識別番号】 100116850
【弁理士】
【氏名又は名称】 廣瀬 隆行

【提出物件の目録】
【物件名】 特許請求の範囲 1
【物件名】 明細書 1
【物件名】 図面 1
【物件名】 要約書 1
【包括委任状番号】 0203751

【書類名】 特許請求の範囲**【請求項 1】**

気体を封じ込めたセルと、
外部共振器型レーザーと、
前記外部共振器型レーザーからのレーザー光の周波数を調整するためのレーザー周波数調整手段と、
前記外部共振器型レーザーからのレーザー光をポンプ光とプローブ光とに分割するレーザー光分割手段と、
前記プローブ光が前記セルを通過した後の光強度を測定する光検出器と、
前記ポンプ光を一定の時間間隔で遮光する ON/OFF 手段と、
前記光検出器が検出したプローブ光の強度、当該プローブ光の一次微分信号、ポンプ光が ON の時と OFF の時のプローブ光の強度の差および一次微分信号の差を求める演算手段と
前記演算手段が求めた一次微分信号の差を用いて、前記外部共振器型レーザーからのレーザー光のレーザー周波数に関する情報を求め、前記レーザー周波数調整手段にフィードバックすることにより前記外部共振器型レーザーの周波数の安定化を図るフィードバック手段とを有する、
レーザー周波数安定化装置。

【請求項 2】

前記セルが四角柱状、又は円柱状である請求項 1 に記載のレーザー周波数安定化装置。

【請求項 3】

前記セルの長さが、3 mm～7 mm である請求項 1 に記載のレーザー周波数安定化装置。

【請求項 4】

前記セルが円柱状であり、前記セルの長さが、5 mm である請求項 1 に記載のレーザー周波数安定化装置。

【請求項 5】

前記セル内に封じ込めた気体が、セシウム原子である請求項 1 に記載のレーザー周波数安定化装置。

【請求項 6】

前記セル内に封じ込めた気体が、セシウム原子であり、
前記外部共振器型レーザーが、セシウム原子の D₂ 線に周波数が同期されるように調整される請求項 1 に記載のレーザー周波数安定化装置。

【請求項 7】

前記外部共振器型レーザーが、1 台の外部共振器型レーザーであり、最大強度を示す波長が 850 nm～854 nm である請求項 1 に記載のレーザー周波数安定化装置。

【請求項 8】

前記レーザー周波数調整手段は、前記外部共振器型レーザーに注入される電流を制御する注入電流制御手段と、前記外部共振器型レーザーに印加される電圧を制御する電圧制御手段のいずれか、又は両方を含む請求項 1 に記載のレーザー周波数安定化装置。

【請求項 9】

前記 ON/OFF 手段が、所定の速度で回転する光学チョッパーである請求項 1 に記載のレーザー周波数安定化装置。

【請求項 10】

前記プローブ光を前記セルの平らな面に導入するための第 1 の光学系と、
前記ポンプ光を前記セルの側面に導入するための第 2 の光学系とを有し、前記第 2 の光学系には、前記ポンプ光のビーム径を広げるための光学手段がある請求項 1 に記載のレーザー周波数安定化装置。

【請求項 11】

外部共振器型レーザーからのレーザー光を分割しポンプ光と、プローブ光を得る光分割工程と、

前記光分割工程で分割されたポンプ光と、プローブ光を気体が封入されたセルに導入する光導入工程と、

レーザー周波数調整手段により外部共振器型レーザーの周波数を変調し、ロックイン検波し、プローブ光の一次微分信号を得る第1の一次微分信号取得工程と、

ON/OFF手段により、一定周期でポンプ光をセルに照射する／照射しないを繰り返し、この周期と同期したロックイン検波を行い、プローブ光の一次微分信号を得る第2の一次微分信号取得工程と、

前記第2の一次微分信号取得工程により取得されたプローブ光の一次微分信号から得られたエラー信号をレーザー周波数調整手段にフィードバックするフィードバック工程を含む

、
原子のサブドップラースペクトルを利用したレーザー光の周波数の安定化方法。

【書類名】明細書

【発明の名称】レーザー周波数安定化装置、及びレーザー周波数安定化方法

【技術分野】

【0001】

この発明は、薄いセルに互いに直交するプローブ光とポンプ光を照射し、サブドップラー分光スペクトルを得、そのスペクトルを用いてレーザー周波数の安定化を図る方法、およびそのような方法に用いられる周波数安定化レーザー装置などに関するものである。

【背景技術】

【0002】

レーザーは、様々な研究分野での基本ツールである。レーザーを用いた測定において高い精度や再現性を実現するためには、レーザー光の周波数を特定の基準に一致するように制御する（すなわちレーザーの周波数を安定化する）必要がある。セル中においては、様々な速度を持った原子が運動しているため、原子固有の共鳴周波数は個々の原子の速度に応じた大きさの周波数シフト（ドップラーシフト）を含んでいる。レーザー光を照射したときに得られる吸収スペクトルは、様々な速度の原子の吸収スペクトルの重ねあわせとなり、ドップラー（Doppler）スペクトルとして観測される。このスペクトルでは、原子固有の共鳴線がはっきりと分離して観測できない。そこで、様々な分光法を用いることにより、そのドップラー分光スペクトルから原子が本来持っている固有の共鳴分光スペクトルをはっきりと分解させたサブドップラー分光スペクトル（Sub-Doppler）を得ている。よりよいレーザーの周波数安定度を得るために、絶対周波数基準として原子や分子のサブドップラー分光スペクトルが一般的に用いられる。

【0003】

従来から、レーザー周波数の安定化のために飽和吸収分光法が知られている [H. Talviti e, M. Merimaa, E. Ikonen: Opt. Commun. 152, 182 (1998), S. Ohshima, Y. Nakadan, Y. Koga: IEEE J. Quantum Electron. QE-23, 473 (1987), U. Tanaka, T. Yabuzaki: Jpn. J. Appl. Phys. 33, 1614 (1997)]。また、同様の目的のために選択反射分光法により観測される狭原子（分子）線を使用する方法が知られている [R. N. Li, S. T. Jia, D. Bloch, M. Ducloy: Opt. Commun. 146, 186 (1998)]。

【0004】

近年、薄い蒸気セルを使用する透過分光法がサブドップラー分光スペクトルの新しい手法として、またレーザー周波数を安定させる有用な技術として注目されるようになった。また、極薄のCsセル（端壁ギャップ（セルの長さ）10-100 μ m）を用いる単一光ビーム透過分光法も知られている [S. Briaudeau, S. Saltiel, G. Nienhuis, D. Bloch, M. Ducloy: Phys. Rev. A 57, R3169 (1998)]。他方で、薄い蒸気セルの光ポンピングは、非マクスウェル速度分布を生じ、それはプローブ光の吸収スペクトル内のサブドップラー構造として現われることが知られている [A. Izmailov: Opt. Spectrosc. 75, 25 (1994), M. Tachikawa, K. Fukuda, S. Hayashi, T. Kawamura: Jpn. J. Appl. Phys. 37, L1559 (1998)]。

【0005】

サブドップラー分光として、薄いセル中のセシウム（Cs）原子を光ポンピングし、薄いセル特有の速度選択性を利用する技術が知られている（例えば、M. Otake, K. Fukuda, M. Tachikawa: Appl. Phys. B 74, 503 (2002)（非特許文献1））。この文献では、半導体レーザーからの一本のレーザー光が二つの経路へ分割され、一方の光はCs原子のD₂線により光ポンピングし、他方の光はその光と垂直方向からセルへ入射、同じ共鳴線の吸収を調べることによって得られるCsのD₂線の超微細構造スペクトルが観測されている。このポンプ・プローブ技術を用いれば、比較的厚いセル（端壁ギャップ0.5-5mm）でも、比較的良好な信号対雑音（S/N）比を与え、鋭敏な共鳴信号を得ることができ、レーザー周波数安定化装置を製作できる。

【0006】

【非特許文献1】M. Otake, K. Fukuda, M. Tachikawa: Appl. Phys. B 74, 503 (20

02)

【発明の開示】

【発明が解決しようとする課題】

【0007】

本発明は、原子のサブドップラー分光スペクトルを用いてレーザー周波数の安定化を図る方法、およびそのような方法に用いられる周波数安定化レーザー装置を得ることを目的とする。

本発明は、従来よりも簡便かつ適切な装置により、レーザー周波数の安定化を図る方法等を提供することを目的とする。

【課題を解決するための手段】

【0008】

上記課題の少なくともひとつは、以下の発明により解決される。

本発明の第1の発明は、

(1) 気体を封じ込めたセル2と、外部共振器型レーザー3と、前記外部共振器型レーザーの周波数を調整するためのレーザー周波数調整手段4（注入電流調整手段、圧電素子）と、前記外部共振器型レーザーからのレーザー光をポンプ光とプローブ光とに分割するレーザー光分割手段5（BS）と、前記プローブ光がセルを通過した後の光強度を測定する光検出器6と、前記ポンプ光を一定の時間間隔で遮光するON/OFF手段7（チョッパー）と、前記光検出器が検出したプローブ光の強度、当該プローブ光の一次微分信号、ポンプ光がONの時とOFFの時のプローブ光の強度の差、および一次微分信号の差を求める演算手段8と、前記演算手段が求めた一次微分信号の差を用いて、前記外部共振器型レーザーのレーザー周波数に関する情報を求め、前記レーザー周波数調整手段にフィードバックすることにより前記外部共振器型レーザーの周波数の安定化を図るフィードバック手段9とを有するレーザー周波数安定化装置である。

(2) 本発明の第1の発明の好ましい態様は、前記セルが四角柱状、又は円柱状である上記(1)に記載のレーザー周波数安定化装置である。

(3) 本発明の第1の発明の好ましい別の態様は、前記セルの長さが、3mm～7mmである上記(1)に記載のレーザー周波数安定化装置である。

(4) 本発明の第1の発明の好ましい別の態様は、前記セルが円柱状であり、前記セルの長さが、5mmである上記(1)に記載のレーザー周波数安定化装置である。

(5) 本発明の第1の発明の好ましい別の態様は、前記セル内に封じ込めた気体が、セシウム原子である上記(1)に記載のレーザー周波数安定化装置である。

(6) 本発明の第1の発明の好ましい別の態様は、前記セル内に封じ込めた気体が、セシウム原子であり、前記外部共振器型レーザーが、セシウム原子のD₂線に周波数が同期されるように調整される上記(1)に記載のレーザー周波数安定化装置である。

(7) 本発明の第1の発明の好ましい別の態様は、前記外部共振器型レーザーが、1台の外部共振器型レーザーであり、最大強度を示す波長が850nm～854nmである上記(1)に記載のレーザー周波数安定化装置である。

(8) 本発明の第1の発明の好ましい別の態様は、前記レーザー周波数調整手段4は、前記外部共振器型レーザーに注入される電流を制御する注入電流制御手段10と、前記外部共振器型レーザーに印加される電圧を制御する電圧制御手段11（圧電素子）のいずれか、又は両方を含む上記(1)に記載のレーザー周波数安定化装置である。

(9) 本発明の第1の発明の好ましい別の態様は、前記ON/OFF手段が、所定の速度で回転する光学チョッパーである上記(1)に記載のレーザー周波数安定化装置である。

(10) 本発明の第1の発明の好ましい別の態様は、前記レーザー光分割手段により分割されたレーザー光の一方であるプローブ光を前記円柱状のセルの平らな面に導入するための第1の光学系（レンズ）と、前記レーザー光分割手段により分割された残りのレーザー光であるポンプ光を前記円柱状のセルの側面に導入するための第2の光学系（レンズ）とを有し、前記第2の光学系には、前記ポンプ光のビーム径を広げるための光学手段（レンズ）がある上記(1)に記載のレーザー周波数安定化装置である。

【0009】

(11) 本発明の第2の発明は、外部共振器型レーザーからのレーザー光を分割しポンプ光と、プローブ光を得る光分割工程と、前記光分割工程で分割されたポンプ光と、プローブ光を気体が封入されたセルに導入する光導入工程と、レーザー周波数調整手段により外部共振器型レーザーの周波数を変調し、ロックイン検波し、プローブ光の一次微分信号を得る第1の一次微分信号取得工程と、ON/OFF手段により、一定周期でポンプ光をセルに照射する／照射しないを繰り返し、この周期と同期したロックイン検波を行い、プローブ光の一次微分信号を得る第2の一次微分信号取得工程と、前記第2の一次微分信号取得工程により取得されたプローブ光の一次微分信号から得られたエラー信号をレーザー周波数調整手段にフィードバックするフィードバック工程を含む、原子のサブドップラースペクトルを利用したレーザー光の周波数の安定化方法である。

【発明の効果】**【0010】**

本発明によれば、原子のサブドップラースペクトルを用いてレーザー周波数の安定化を図る方法、およびそのような方法に用いられる周波数安定化レーザー装置を提供することができる。

本発明によれば、従来よりも簡便かつ適切な装置により、レーザー周波数の安定化を図る方法等を提供することができる。

【発明を実施するための最良の形態】**【0011】**

以下、本発明を図面に基づいて説明する。図9は、本発明の一実施態様に係るレーザー周波数安定化装置の構成を示す図である。図9に示されるように、本発明のレーザー周波数安定化装置1は、気体を封じ込めたセル2と、外部共振器型レーザー3と、前記外部共振器型レーザーの周波数を調整するためのレーザー周波数調整手段4と、前記外部共振器型レーザーからのレーザー光をポンプ光とプローブ光とに分割するレーザー光分割手段5(BS)と、前記プローブ光がセルを通過した後の光強度を測定する光検出器6と、前記ポンプ光を一定の時間間隔で遮光するON/OFF手段7(チョッパー)と、前記光検出器が検出したプローブ光の強度、当該プローブ光の一次微分信号、ポンプ光がONの時とOFFの時のプローブ光の強度の差、および一次微分信号の差を求める演算手段8と、前記演算手段が求めた一次微分信号の差を用いて、前記外部共振器型レーザーのレーザー周波数に関する情報を求め、前記レーザー周波数調整手段にフィードバックすることにより前記外部共振器型レーザーの周波数の安定化を図るフィードバック手段9とを有する。図中、10は、注入電流制御手段を表し、図中、11は、電圧制御手段を表す。

【0012】**(セル)**

セルとしては、気体を封入できるセルであれば特に限定されるものではなく、公知のガスセルを用いることができる。

セルの形状としては、四角柱状、円柱状のものが挙げられ、好ましくは円柱状のものである。

セルが円柱状の場合、その円柱の直径は、特に限定されるものではないが、例えば、1mm～100mmであり、好ましくは10mm～50mmであり、より好ましくは20mm～40mmである。

セルの長さとしては、特に限定されないが、好ましくは0.1mm～10mmである。本明細書の実施例により確認されたように、セル内部の厚さ(気体が封入される部分の長さ)としては、例えば0.5mm～10mmが挙げられ、好ましくは2mm～10mmであり、より好ましくは3mm～7mmであり、さらに好ましくは4mm～6mmであり、特に好ましくは5mmである。

【0013】**(外部共振器型レーザー)**

外部共振器型レーザーは複数台用いることもできるが、好ましくは1台の外部共振器型レ

ーザーを用いる。外部共振器型レーザーが1台であれば、装置が複雑になることを防ぐことができる。外部共振器型レーザーとしては、最大強度を示すレーザー光の波長が850 nm～854 nmであるものが好ましく、特に852 nm付近に最大強度をもつレーザー光を発する外部共振器型レーザーが好ましい。外部共振器型レーザーとしては、セシウム原子のD₂線に周波数が同期されるように調整されるものが好ましい。

【0014】

(レーザー周波数調整手段)

レーザー周波数調整手段4は、好ましくは外部共振器型レーザーに注入される電流を制御する注入電流制御手段10と、外部共振器型レーザーに印加される電圧を制御する電圧制御手段11(圧電素子)のいずれか、又は両方を含む。注入電流制御手段としては、外部共振器型レーザーに注入される電流を制御する公知の電流調整器を用いることができる。電圧制御手段は、好ましくは圧電素子を含み、後述のフィードバック手段からの制御情報に基づいて外部共振器型レーザーに印加する電圧を制御する回路を有する。

【0015】

(レーザー光分割手段)

レーザー光分割手段は、レーザー光を2つに分割するための手段である。したがって、レーザー光分割手段としては、レーザー光を2つに分割することのできるものであれば特に限定されることはなく、例えば公知の光学素子などのビームスプリッターを用いることができる。

【0016】

(光検出器)

光検出器は、光の強度を測定する装置である。光検出器としては、レーザー光の強度を測定することのできるものであれば特に限定されるものではなく、公知の光検出器を用いることができる。光検出器としては、例えば、特開10-284772号公報、特開2001-285064号公報、特開2002-76890号公報、中桐ら、電波研究季報 Vol. 29, No. 149 pp. 97-115 (1983)などに記載されたものを用いることができる。

【0017】

(ON/OFF手段)

ON/OFF手段は、光をある時間間隔で、遮ったり、遮らなかつたりするための手段である。ON/OFF手段としては、光の所定の時間間隔で遮ることのできるものであれば、特に限定されるものではなく、公知のON/OFF手段を用いることができる。ON/OFF手段としては、例えば公知の光学チョッパーを用いることもできるし、一定の時間間隔で光を発振する装置を用いても良い。光学チョッパーの時間間隔としては1.5 kHz程度のものが挙げられる。

【0018】

(演算手段)

演算手段は、例えば、第1のロックイン増幅器と、第2のロックイン増幅器を含むものが挙げられる。この演算手段によれば、第1のロックイン増幅器は、光検出器の出力を増幅する。また、第2のロックイン増幅器は、前記ON/OFF手段から、ポンプ光が照射された／照射されない時間に関する情報を入手し、第1のロックイン増幅器の出力をポンプ光照射時(例えば図2(a))、とポンプ光遮蔽時(例えば図2(b))のものに分けて、それらの差分スペクトル(周波数弁別スペクトル;例えば、図2(c))を求める。

【0019】

なお、ロックイン増幅器とは、ロックイン検出を用いる増幅器のことをいう。ロックイン検出とは、信号を変調する事によって、そのスペクトルを雑音スペクトルの主成分から離れた周波数帯域に移し、位相敏感検波により、よいS/Nで検出する方法をいう。

【0020】

(フィードバック手段)

フィードバック手段は、例えば、上記の差分(ポンプ光照射／遮蔽時のサブドップラースペクトルの1次微分信号の差分)を用いて、外部共振器型レーザーにフィードバックする

情報を求める。すなわち、例えば、上記差分が図 2 (c) のグラフによって表される場合、まず、セシウム原子の $F=4 \rightarrow F'=3$ 成分、 $F=4 \rightarrow F'=4$ 成分または $F=4 \rightarrow F'=5$ 成分へロックする。この例では信号強度が 0 となる部位の周囲の環境から $F=4 \rightarrow F'=4$ 成分と $F=4 \rightarrow F'=5$ 成分をロック位置として特に好ましく用いることができる。例えば、 $F=4 \rightarrow F'=5$ 成分へロックした場合、差分スペクトルの強度が負になれば、例えば図 2 (c) のグラフに基づいて外部共振器型レーザーの周波数を下げ、差分スペクトルの強度が正になれば、例えば図 2 (c) のグラフに基づいて外部共振器型レーザーの周波数を上げるようにフィードバック情報を求める。

【0021】

フィードバック情報としては、例えば、レーザー周波数調整手段としての圧電素子からなる電圧調整手段に、印加される電圧に関する情報などが挙げられる。

【0022】

(光学系)

レーザー光の光通路を制御する光学系としては公知の技術を用いて調整することができる。本発明においては、例えば、プローブ光をセルの平らな面に導入するための第 1 の光学系と、ポンプ光をセルの側面に導入するための第 2 の光学系とを有し、前記第 2 の光学系には、ポンプ光のビーム径を広げるための光学手段があるものが挙げられる。このような、ポンプ光のビーム径を広げるための光学手段としては、レンズや、対向する一対のレンズ 37 などが挙げられる。

【0023】

(レーザー周波数安定化方法)

次に、上記の構成を有する周波数安定化装置の動作、すなわちレーザー周波数の安定化方法について説明する。本発明のレーザー周波数安定化方法は、例えば、外部共振器型レーザーからのレーザー光を分割しポンプ光と、プローブ光を得る光分割工程と、前記光分割工程で分割されたポンプ光と、プローブ光を気体が封入されたセルに導入する光導入工程と、レーザー周波数調整手段により外部共振器型レーザーの周波数を変調し、ロックイン検波し、プローブ光の一次微分信号を得る第 1 の一次微分信号取得工程と、ON/OFF 手段により、一定周期でポンプ光をセルに照射する／照射しないを繰り返し、この周期と同期したロックイン検波を行い、プローブ光の一次微分信号を得る第 2 の一次微分信号取得工程と、前記第 2 の一次微分信号取得工程により取得されたプローブ光の一次微分信号から得られたエラー信号をレーザー周波数調整手段にフィードバックするフィードバック工程を含む。

【実施例】

【0024】

(実施例 1)

図 1 に、ECDL (外部共振器型ダイオードレーザー) 21 の周波数を安定化するための装置の例を示す。セル 22 として円筒形 (直径 3 cm)、厚さ 3 mm のパイレックス (登録商標) ガラスで造られた Cs 蒸気セルを用いた。セルは、長さが 0.5、1、2、5、10 mm の 5 通りのものを用意した。Cs 原子の密度は、室温で約 3×10^{10} 個/cm³ とした。原子の速度が変化するような衝突に対する平均自由行程は、1.4 m である。ECDL (New focus 6226) は、Cs の D₂ 線の近く 852 nm で発振する。500 kHz (50 ms) の発振線幅は、圧電素子 (PZT) を含む電圧調整器 23 に取り付けられる外部格子から、光学的にフィードバックすることで得た。その周波数は、PZT 電圧を変更することによって調整した。

【0025】

レーザー光を、光アイソレータ 24 を通過させ、BS (ビームスプリッター) 25 により 2 つの経路へ分割した。片方の光は、一対のレンズ 37 で拡大した後に、側壁からセルへ導いた。ポンプ光は、セル内の全体に照射された。なお、ポンプ光は、直線偏光である。他方の光は、直線偏光され、5 mm の直径を有する光となり、プローブ光としてセルの中心部を通過した。プローブ光強度は、 $20 \mu\text{W}/\text{cm}^2$ であった。ガラス表面の反射に

より生じる交差共鳴を観測しないように、プローブ光の強度を、十分に低く保った。

【0026】

線形吸収信号を得るために、プローブ光を高度に敏感な低雑音光検知器 (New focus 2001) 26へ焦点を合わせた。電流調整器27によりインジェクション電流を10kHzで変調することによって、レーザー周波数を変調した。周波数変調振幅は、約25MHzであった。光検出器からの出力信号を、変調周波数でロックイン検波した。ロックイン増幅器 (アンプ) #1 (28) の低域通過フィルタの時定数は、100μsであった。図2に、ロックイン増幅器からの一次微分信号の典型的な観測結果を示す。ロックイン増幅器からの出力信号をレーザー周波数に対する曲線グラフにする。ポンプ光がセルを照射するとき、図2aに示すように3つの超微細成分が互いに分割される。それらはF=4超微細準位からF=3準位へと遅い原子の分布変動から生じる。ポンプ光が遮断された場合は、その成分がドップラースペクトルに埋もれてしまい、3つの超微細成分に分解されない (図2b参照)。そのプロファイルは、ドップラー広がり起因するプロファイルを含む微分信号である。3つの超微細成分を分解するために、図2aに示す出力信号からドップラー広がりを除くように光学チョッパーを使用した。光学チョッパー29の変調周波数は、1.5kHzであった。図2cに、ロックイン増幅器#2 (30) からの合成信号を示す。ロックイン増幅器の時定数は3msであった。レーザー周波数は、図2cの復調信号を誤差信号として使用することにより超微細成分のピークへロックした。出力を、積分器と比例増幅器とで構成されるサーボコントローラを通じてPZTへフィードバックした。

なお、図1中、31は、関数生成器であり、ロックイン増幅器1や電流調整器に対し、所定の関数情報を与える。図1中、32は、ビームスプリッターであり、このビームスプリッターにより分波されたビームは、ビート周波数の測定に用いられる。図1中、33、及び34はアテニュエーターであり、光強度を制御する。図1中、35、及び36は、光学素子であり、光路などを調整する。

【0027】

一般的に、レーザー光源の周波数安定度は、同じ方法で安定化された2セットのレーザー光源によるビート周波数のアラン分散を測定することによって評価される。白色雑音の影響下では、アラン分散の平方根は次の式で定義される。

【0028】

$$(式) \sigma_y(\tau) \approx \frac{1}{QS/N} \tau^{-1/2} \quad (1)$$

【0029】

ここに、Qは周波数弁別のために使用される共鳴の鋭さを表す係数 (Q値) である。S/Nは誤差信号の信号対雑音比であり、 τ は平均化時間である [H. Talvitie, M. Merimaa, E. Ikonen: Opt. Commun. 152, 182 (1998)]。誤差信号のライン幅が狭くなるほどQ値は大きくなる。薄セル分光法において、セル長が長くなるとS/Nは改善されるが、同時に共鳴のライン幅は広がる。周波数安定化に対する最適なセル長を見つけるために、ロックイン検出されたスペクトルのライン幅とS/Nを測定した。

【0030】

図3に、誤差信号ライン幅のセル長に対する依存性を示す。ライン幅は一次微分信号のピークとピークの周波数差から決定される。測定されたライン幅は、長いセル長に対し速度選択性を鈍らせるため、セル長の増加に伴い広がる。非共鳴的に励起された原子がF=4→F'=5成分に主に寄与するため、そのサブドップラースペクトルはF=4→F'=4成分よりも鋭敏である [M. Otake, K. Fukuda, M. Tachikawa: Appl. Phys. B 74, 503 (2002)]。

【0031】

図4に一次微分信号のS/Nのセル長に対する依存性を示す。S/Nは、一次微分信号における雑音振幅で割られたピーク間振幅によって与えられる。評価されたS/Nはセル長5mmまで増加している。しかしながら、10mmセルのS/Nは5mmセルのそれより小さい。セル長が

長くなったとき、光を吸収する原子数は増加するが、スペクトルはさらに広がる。この二つの要因のトレードオフな関係において、一次微分信号の振幅はセル長 5 mm で最大値を取る。

【0032】

図5にライン幅とS/Nの比がセル長に対してプロットされている。この結果から、今回の実験において、一番の周波数安定度はセル長5mmで得られることがわかる。

【0033】

次に、ECDL光源を2セット作成し、5mmセルを使って周波数安定化を図り、2つのレーザー間のビート（うねり）信号によって、レーザー光の周波数安定度を測定した。片方のレーザーは $F=4 \rightarrow F'=4$ 成分へロックされ、他方は $F=4 \rightarrow F'=5$ 成分へロックされ、ビート周波数250MHzを生じた。ポンプ光強度は 1.3 mW/cm^2 であり、このとき $F=4 \rightarrow F'=4$ 成分のライン幅対S/Nの比率と $F=4 \rightarrow F'=5$ 成分の場合のそれとがほぼ同じであった。

【0034】

図6に、平均化時間 τ の関数としてのビート周波数のアラン分散 σ_y の平方根を示す。周波数安定化していないレーザーと安定化した場合のレーザーのアラン分散との比較の結果から、平均化時間が0.5秒以上でサーボループによって周波数安定度が10倍ないし100倍改善されていることがはっきりと観測されている。白色雑音の影響下では、アラン分散の平均化時間に対する傾きは式（1）によって評価される。図6に示される周波数安定度 σ_y は10秒より短い τ に対し、理論的に推定された傾きの線とよく一致する。周波数変動は、この範囲内では、ほとんど白色雑音によるものであることがわかる。最小 σ_y は5秒で 6.2×10^{-11} であった。実験室の空調の不完全さによる室温変動のため、10秒以後の平均化時間において、周波数安定度は悪化した。

【0035】

これまでに示した実験の条件では、光検出器の出力信号のノイズはプローブ光のショットノイズが支配的である。ショットノイズによって誘起される周波数変動は、入射光強度と周波数弁別スペクトルの傾きから評価できる。図6における実線はアラン分散の平方根のショットノイズリミットである。実験値はこのショットノイズリミットより二倍大きく、この違いは、電気回路における熱雑音や音響雑音のような他のノイズ源によって引き起こされていると考えられる。この安定度は、光検出器入射パワーが $6 \mu\text{W}$ の時に、達成される。プローブ光強度を大きくすれば、よりよい安定度が期待される。

【0036】

低いレーザーパワーでのこの周波数安定化方法の実現可能性を評価するために、サブドップラー信号のポンプ光強度に対する依存性を調べた。図7では、観測された一次微分信号の振幅がポンプ光強度に対してプロットされている。 $F=4 \rightarrow F'=4$ 成分と $F=4 \rightarrow F'=5$ 成分の両方ともポンプ光強度に対し単調に増加している。 $F=4 \rightarrow F'=4$ 成分に対する曲線は、 $F=4 \rightarrow F'=5$ 成分に対する曲線より、より低い光強度でフラットになる傾向がある。これは以下のように説明される。レーザー周波数が $F=4 \rightarrow F'=5$ 共鳴線に近いとき、 $F=4 \rightarrow F'=4$ 遷移を通して光励起が起こる。この非共鳴遷移に対する飽和強度は、共鳴の場合すなわちレーザー周波数が $F=4 \rightarrow F'=4$ 遷移に近いときより、ずっと大きくなる [M. Otake, K. Fukuda, M. Tachikawa: Appl. Phys. B 74, 503 (2002)]。500 $\mu\text{W/cm}^2$ 以下という弱いポンプ光強度でさえ、一次微分信号は適度によりS/Nで観測される。

【0037】

図8aにポンプ光強度がかなり弱いとき（100 $\mu\text{W/cm}^2$ ）に観測された一次微分スペクトルを示す。セル長は5mm、プローブ光強度は20 $\mu\text{W/cm}^2$ である。同じレーザー強度とセル長で得られた飽和吸収信号を図8bに比較のために示す。薄セル分光法のS/NとスペクトルQ値は従来の飽和吸収スペクトルのそれと同じくらい良い値である。

【0038】

飽和吸収分光において、 $F=4 \rightarrow F'=4$ ($\Delta F=0$) 共鳴線と、 $F=4 \rightarrow F'=3$ 遷移と $F=4 \rightarrow F'=5$ 遷移とで生じるクロスオーバー共鳴線C2が互いに重複している（図8b参照）。薄セル分光法

では、 $\Delta F=0$ 遷移のクリアな観測を妨げるクロスオーバー共鳴線が原理的に生じないことが主な利点として挙げられる。

【0039】

ドップラー広がりによるバックグラウンドを取り除くために、今回は光チョッパーによるon-offロックイン検出を行った。基底状態の原子数分布の緩和は、原子とセルの端面との衝突によるものが主である。この緩和の時定数は、端面間の飛行時間によって決まり、5 mmのセル、200 m/sの原子では25 μ 秒になる。従って原子系は数十kHzのon-off変調を許容できる。

【0040】

本発明を使って周波数安定化されたレーザーの発振周波数と、原子の共鳴周波数とのずれについて、文献[M. Otake, K. Fukuda, M. Tachikawa: Appl. Phys. B 74, 503 (2002)]で示されたレート方程式モデルから、この周波数シフト量を見積もった。 $F=4 \rightarrow F'=4$ 成分の周波数のロックポイントは共鳴中心より30kHz低く、 $F=4 \rightarrow F'=5$ 成分のロックポイントは740kHz低いという結果が得られた。

【0041】

ドップラー広がりによるバックグラウンドによる周波数のロックポイントの統計的なシフトは、吸収信号の三次微分信号を使うことでも大きく低減できる。一次微分信号に比べて三次微分信号は、ライン幅は狭くなるがS/Nは小さくなる[A. Izmailov, K. Fukuda, M. Kinoshita, M. Tachikawa: Laser Phys., in press.]. 実際に一次および三次微分信号のQ値とS/Nを、同じ実験条件で比較を行った。三次微分信号のQ値は一次微分信号のそれより3倍大きくなった。しかしながら、三次微分信号のS/Nは一次微分信号のその1/40になった。周波数安定化にとっては、光チョッパーによるon-offロックイン検出による一次微分信号の方が三次微分信号を使用するよりも良好である。

【0042】

以上から、薄いセルを使って観測されるサブドップラースペクトルは、外部共振器型半導体レーザー光源の周波数を安定化する目的に、使用できることが立証された。この実験では、一番良い周波数安定度は5mmのセル長を使用したときに得られた。光強度20 μ W/cm²のプロープ光を使って、 6.2×10^{-11} の最小 σ_y が平均化時間5秒で達成された。サブドップラー共鳴線は100 μ W/cm²というかなり弱いポンプ光強度でさえ、はっきりと観測された。この分光法は、スペクトル解析や周波数安定化を本質的に複雑にするクロスオーバー共鳴線を生じない方法である。

【産業上の利用可能性】

【0043】

本発明は、レーザー光の周波数を安定化することができるので、外部共振器型レーザーを用いるあらゆる技術に用いることができる。

本発明によればレーザー光の周波数を安定化できるので、本発明は、たとえば原子時計など極めて正確なレーザー周波数を用いる分野において利用することができる。

【図面の簡単な説明】

【0044】

【図1】 図1に、ECDLを安定化するための装置を示す。

【図2】 図2はロックイン増幅器#1からのCsD₂線の吸収スペクトルの一次微分信号を表す。図2(a)はポンプ光がONのとき、図2(b)はポンプ光がOFFのときのものである。セルの長さは1mmである。図2(c)は、ロックイン増幅器#2からの出力であり、その微分信号はレーザーの周波数安定化に使用される。

【図3】 図3は、観測された誤差信号のライン幅のセル長に対する依存性を表す。黒丸は $F=4 \rightarrow F'=4$ 成分用のデータを表し、白丸は $F=4 \rightarrow F'=5$ 成分用のデータを表す。

【図4】 図4は、誤差信号のS/Nのセル長に対する依存性を表す。黒丸は $F=4 \rightarrow F'=4$ 成分用のデータを表し、白丸は $F=4 \rightarrow F'=5$ 成分用のデータを表す。

【図5】 図5は、ライン幅対S/Nの比率のセル長に対する依存性を表す。黒丸は $F=4 \rightarrow F'=4$ 成分用のデータを表し、白丸は $F=4 \rightarrow F'=5$ 成分用のデータを表す。

【図6】図6は、二台のECDL光源間のビート周波数のアラン分散の平方根を示す。三角形は二つの周波数安定化されていないレーザーに対するデータを示し、菱形は二つの周波数安定化されたレーザーのそれを示す。破線は理論的曲線を示す。実線はショットノイズリミットを表す。

【図7】図7は誤差信号の観測された振幅のポンプ光強度依存性を表す。黒丸は $F=4 \rightarrow F'=4$ 成分用のデータを表示し、白丸は $F=4 \rightarrow F'=5$ 成分用のデータを表示する。

【図8】図8はCsD₂線の吸収スペクトルの一次微分信号を示す。図8aは薄セル分光法によるものを、図8bは飽和吸収分光法による誤差信号である。セルの長さは5mm、ポンプ光強度は両方の場合とも $100 \mu\text{W}/\text{cm}^2$ である。C1、C2、C3はそれぞれ、 $F=4 \rightarrow F'=3$ と $F'=4$ の対、 $F=4 \rightarrow F'=3$ と $F'=5$ の対、 $F=4 \rightarrow F'=4$ と $F'=5$ の対によるクロスオーバー共鳴線を表している。

【図9】図9は、本発明のレーザー周波数安定化装置の概略図を示す。

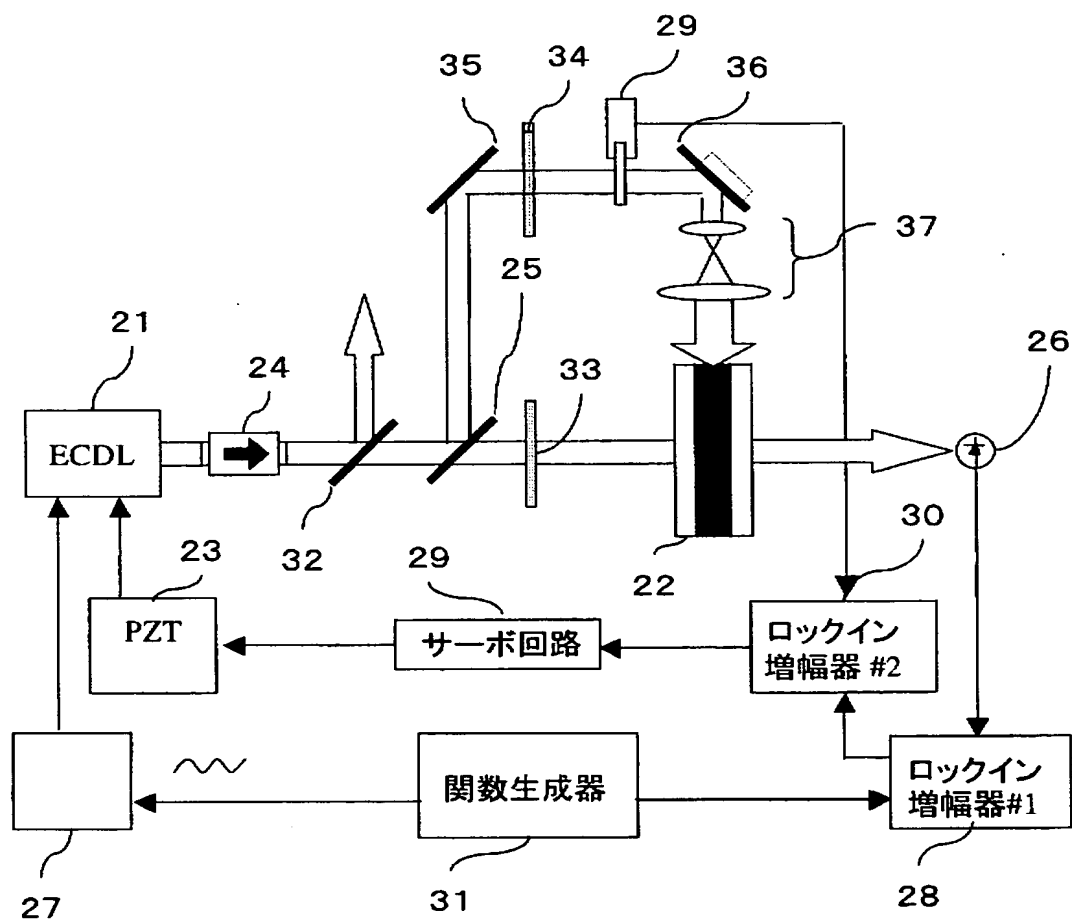
【符号の説明】

【0045】

- 1 レーザー周波数安定化装置
- 2 セル
- 3 外部共振器型レーザー
- 4 レーザー周波数調整手段
- 5 レーザー光分割手段
- 6 光検出器
- 7 ON/OFF手段
- 8 演算手段
- 9 フィードバック手段
- 10 注入電流制御手段
- 11 電圧制御手段
- 21 ECDL
- 22 蒸気セル
- 23 電圧調整器
- 24 光アイソレーター
- 25 ビームスプリッター
- 26 低雑音光検出器
- 27 電流調整器
- 28 ロックイン増幅器#1
- 29 光学チョッパー
- 30 ロックイン増幅器#2
- 31 関数生成器
- 32 ビームスプリッター
- 33 アテニュエーター
- 34 アテニュエーター
- 35 光学素子
- 36 光学素子
- 37 一對のレンズ

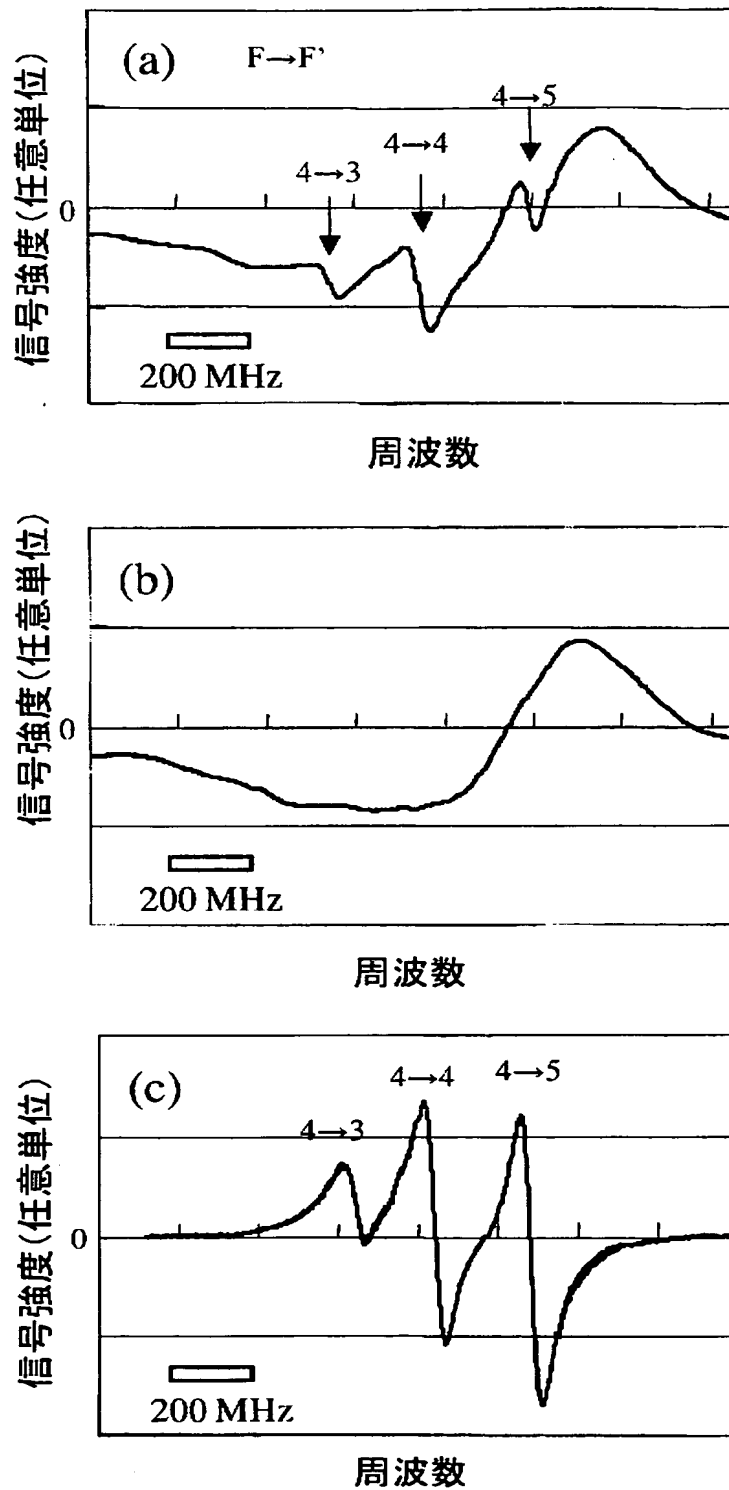
【書類名】 図面

【図 1】

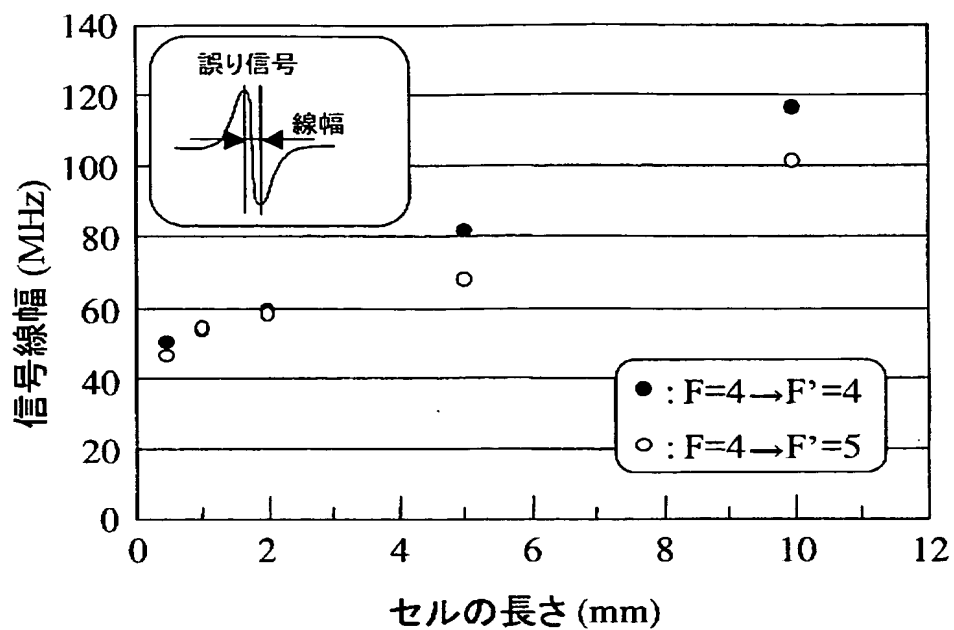


1

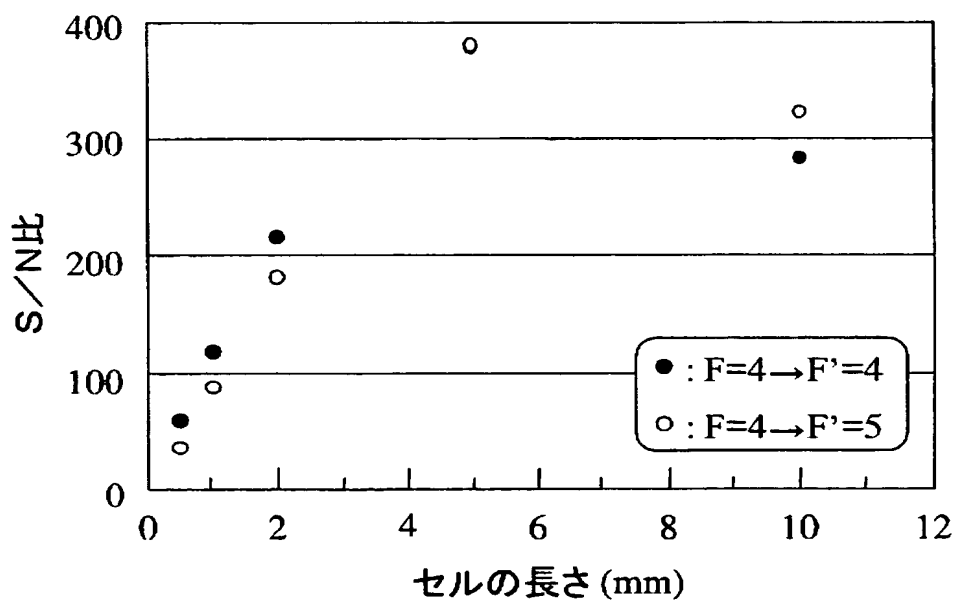
【図 2】



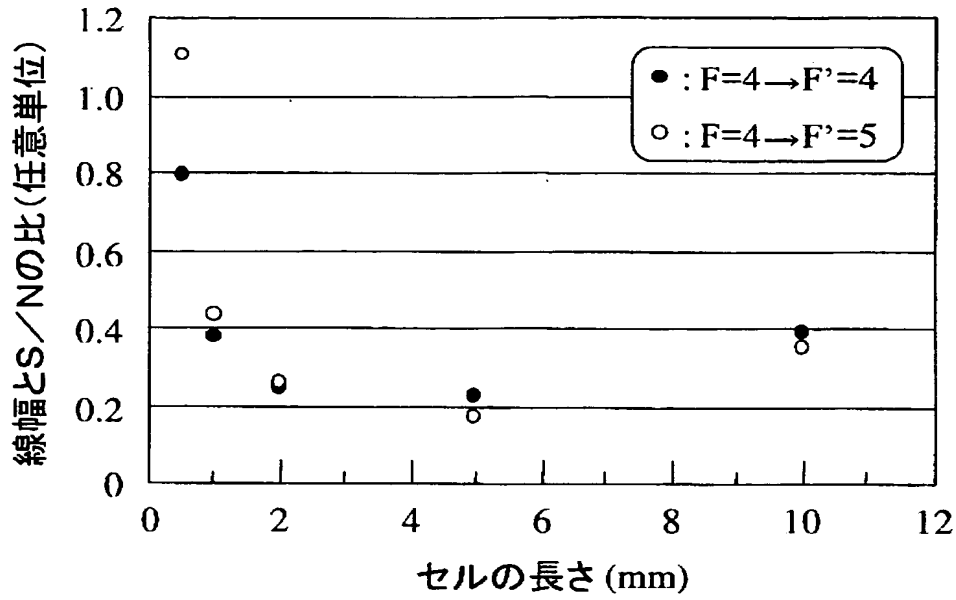
【図 3】



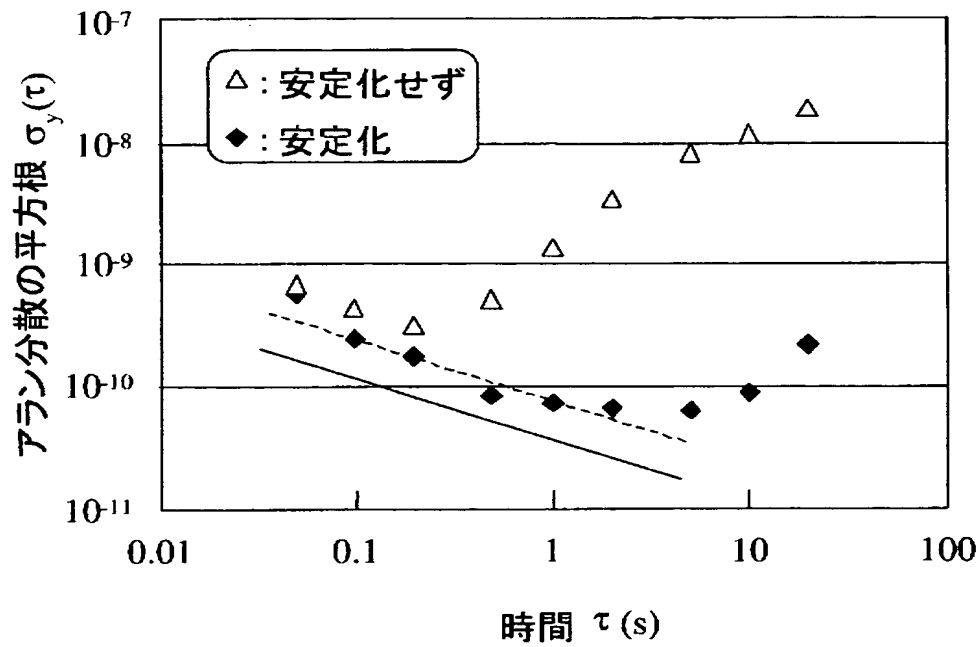
【図 4】



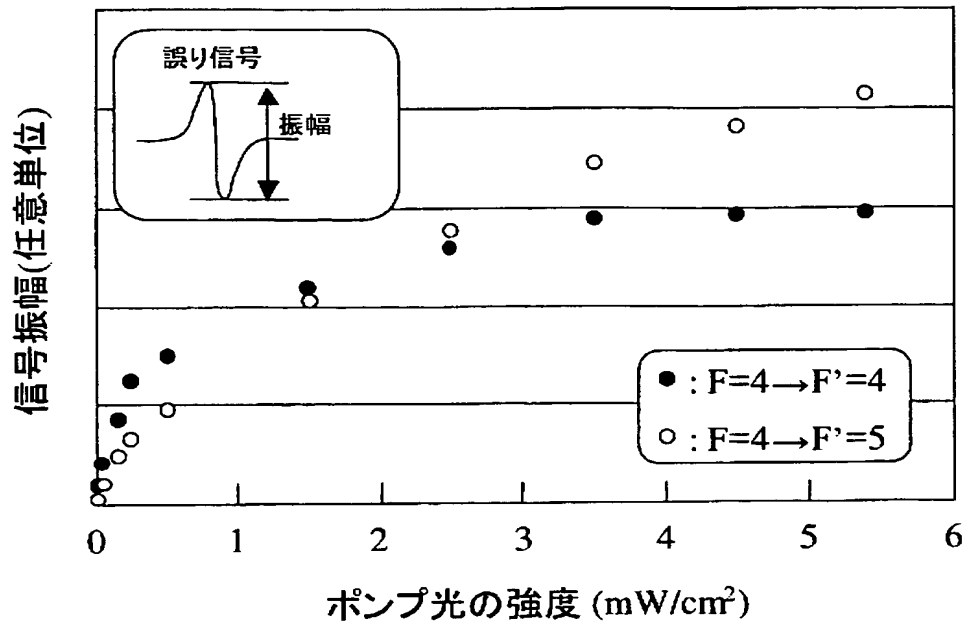
【図 5】



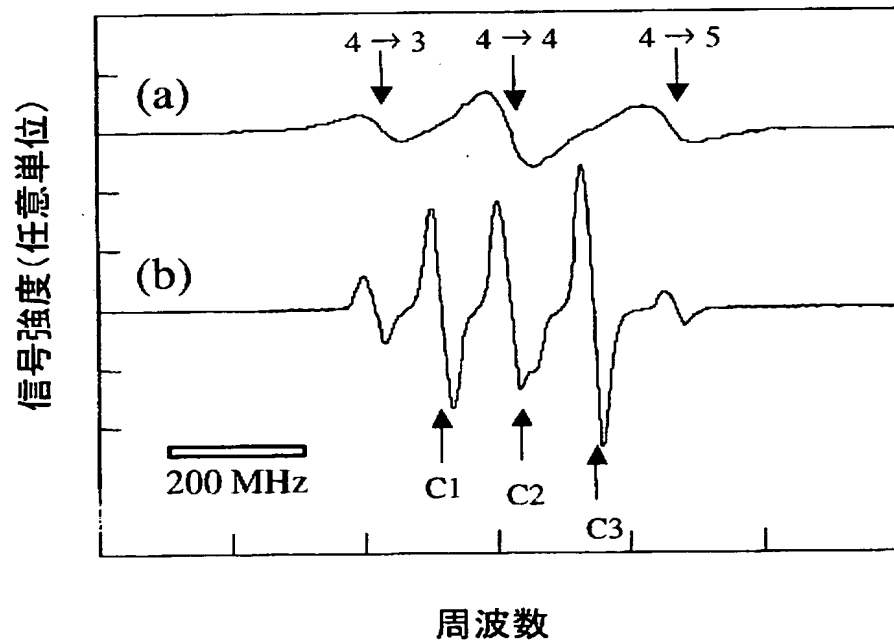
【図 6】



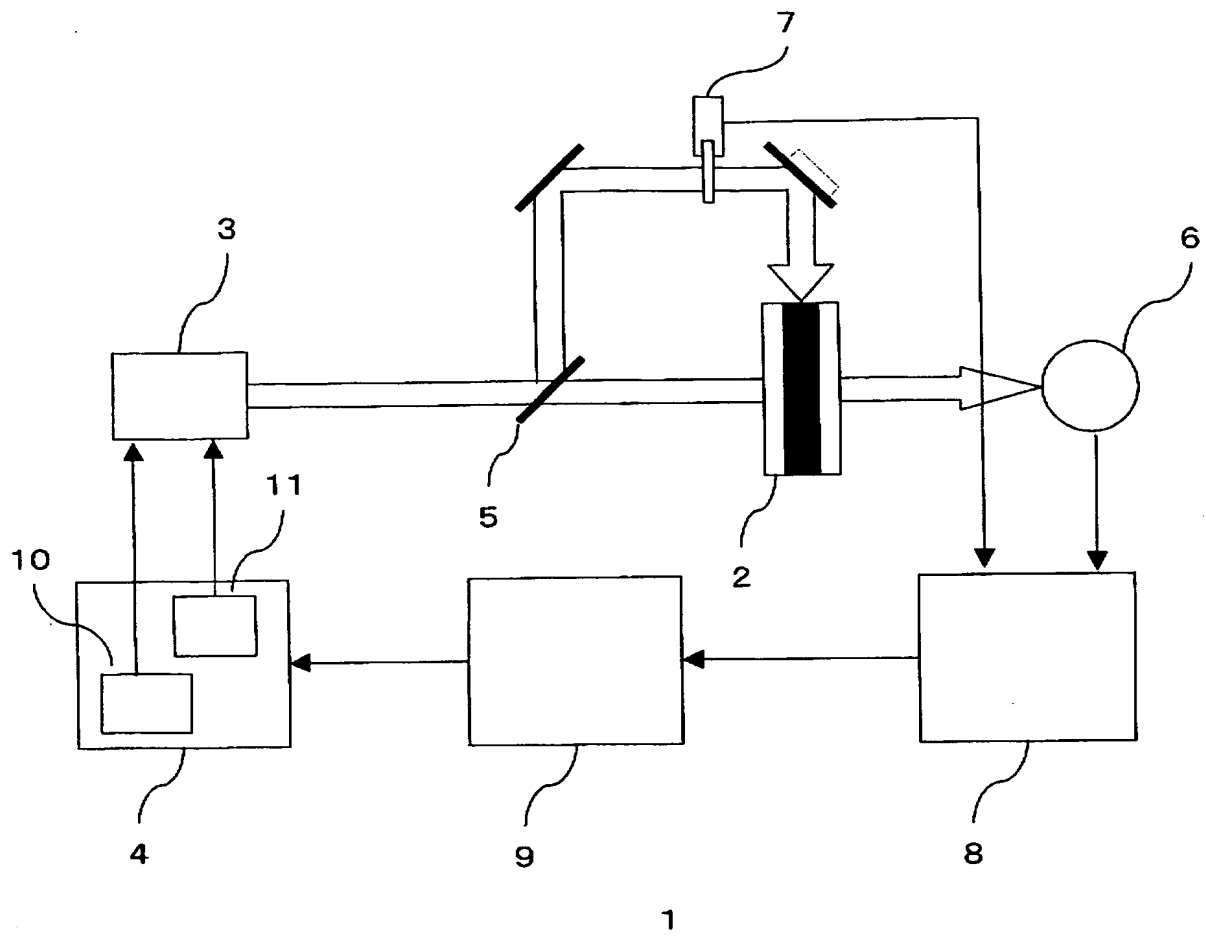
【図 7】



【図 8】



【図 9】



【書類名】 要約書**【要約】**

【課題】 原子のサブドップラー分光スペクトルを用いてレーザー周波数の安定化を図る方法、およびそのような方法に用いられる従来よりも簡便かつ適切な周波数安定化レーザー装置を提供すること。

【解決手段】 気体を封じ込めたセル 2 と、外部共振器型レーザー 3 と、前記外部共振器型レーザーの周波数を調整するためのレーザー周波数調整手段 4 と、前記外部共振器型レーザーからのレーザー光をポンプ光とプローブ光とに分割するレーザー光分割手段 5 と、前記プローブ光がセルを通過した後の光強度を測定する光検出器 6 と、前記ポンプ光を一定の時間間隔で遮光する ON/OFF 手段 7 と、前記光検出器が検出したプローブ光の強度、当該プローブ光の一次微分信号、ポンプ光が ON の時と OFF の時のプローブ光の強度の差、および一次微分信号の差を求める演算手段 8 と、前記演算手段が求めた一次微分信号の差を用いて、前記外部共振器型レーザーのレーザー周波数に関する情報を求め、前記レーザー周波数調整手段にフィードバックすることにより前記外部共振器型レーザーの周波数の安定化を図るフィードバック手段 9 とを有するレーザー周波数安定化装置。

【選択図】 図 9

特願 2 0 0 3 - 2 9 6 7 8 2

出 願 人 履 歴 情 報

識別番号

[3 0 1 0 2 2 4 7 1]

1. 変更年月日

2 0 0 1 年 4 月 2 日

[変更理由]

新規登録

住 所

東京都小金井市貫井北町 4 - 2 - 1

氏 名

独立行政法人通信総合研究所